- 11. Хабибуллин И. Л., Закирова Γ . А. Моделирование протаивания мерзлого грунта под теплоизоляционными слоями // Вестник Башкирского университета. -2014. -T. 19, № 4. -C. 1131–1139.
- 12. Кондратьев К. Я., Пивоварова З. И., Федорова Н. И. Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 215 с.
 - 13. Справочник по климату СССР. Ч. 1. Радиация. Выпуски 1–34. Л.: Гидрометиоиздат, 1968–1970.
- 14. Хабибуллин И. Л., Солдаткин М. В. Динамика промерзания сезонно-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // Вестник Башкирского университета. 2012. Т. 17, № 2. С. 843–846.
- 15. Хабибуллин И. Л., Хусаинова З. Р., Лобастова С. А. Термогидрадинамическое моделирование процесса термоэрозии грунтов криолитозоны // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2005. Т. 12, № 4. С. 1118
- 16. Хабибуллин И. Л., Нигаметьянова Г. А. Термомеханическая модель определения устойчивости многослойных склонов криолитозоны // Фундаментальная математика и ее приложения в естествознании. Сб. тезисов докладов VIII Междунар. школы-конференции для студентов, аспирантов и молодых ученых. Уфа: БашГУ, 2015. 316 с.

Сведения об авторах

Хабибуллин Ильдус Лутфурахманович, д. ф.-м. н., профессор кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 8(347)2735162, e-mail:habibi.bsu@mail.ru

Нигаметьянова Гузель Аниловна, аспирант кафедры прикладной физики, Башкирский государственный университет, г. Уфа, тел. 89603984026, e-mail:gyzelua@mail.ru

Information about the authors

Khabibullin I. L., Doctor of Physics and Mathematics, Professor at the Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, phone: 8(347)2735162, e-mail: habibi.bsu@mail.ru

Nigametuanova G. A., Postgraduate at the Department of Applied Physics, Bashkir State University, Ufa, phone: 89603984026, e-mail: gyzelua@mail.ru

Бурение скважин и разработка месторождений

УДК 622.691.553

ПОДЗЕМНЫЕ ХРАНИЛИЩА ГАЗА, ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ GENERAL CLASSIFICATION OF UNDERGROUND GAS STORAGES

Ш. А. Арсан, А. К. Ягафаров, Ю. В. Ваганов

Sh. A. Arsan, A. K. Yagafarov, Yu. V. Vaganov

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: хранение газа; подземное хранилище газа; объем; классификация Key words: gas storing; Underground Gas Storage; size; classification

Подземные хранилища природного газа (Underground Gas Storage) являются неотъемлемой составляющей энергетической системы страны. В настоящее время не только добыча, но и хранение газа — вопрос довольно проблемный [1]. Большую часть газа потребляют города и промышленность, удаленные от газовых месторождений, поэтому от мест добычи газа до потребителей прокладывают газопроводы континентальных масштабов. Добыча газа происходит постоянно, но в медленном темпе. Таким образом, количество добываемого газа не может удовлетворить потребности населения в летний и зимний периоды в равной степени.

В мире насчитывается более 600 подземных хранилищ газа (ПХГ) с рабочим объемом газа более 340 млрд ${\rm M}^3$, из них 200 млрд ${\rm M}^3$ от общего рабочего объема газа находятся в Европе и Центральной Азии.

Количество подземных хранилищ газа возросло после Второй мировой войны. Для того чтобы удовлетворить увеличение сезонного спроса, производительность трубопроводов (и, соответственно, их размер), пришлось бы резко увеличить.

С целью удовлетворения сезонного повышенного спроса были разработаны подземные хранилища газа [2, 3] (рис. 1).

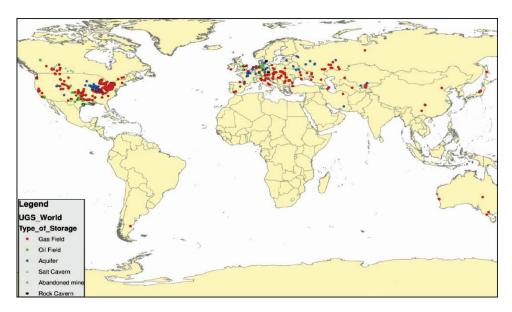


Рис.1. Местонахождение подземных хранилищ газа на карте мира

Природный газ, как и большинство других сырьевых товаров, может храниться в течение неопределенного периода времени. Разведка, добыча и транспортировка природного газа занимают много времени, и когда природный газ достигает своего места назначения, то не всегда требуется использовать его сразу, поэтому газ закачивают в подземные хранилища. Эти хранилища могут быть расположены вблизи трассы магистральных газопроводов и крупных газопотребляющих центров.

Традиционно природный газ является сезонным топливом, то есть спрос на природный газ обычно выше зимой. Это отчасти потому, что он используется для отопления жилых и коммерческих помещений. Хранение природного газа играет важную роль. Благодаря этому избыток газа, доставляемого в летние месяцы, покрывает возросший на него спрос в течение зимних месяцев. Однако, согласно последним тенденциям электрического поколения, спрос на природный газ в летние месяцы также растет (например, из-за увеличения спроса на электроэнергию в связи с использованием кондиционеров). Природный газ в хранилищах также служит страховкой от непредвиденных аварий, стихийных бедствий или других происшествий, которые могут повлиять на производство или доставку природного газа [1, 4, 5].

Существуют два основных направления использования природного газа в хранилищах: *базисное ПХГ* (Base load UGS) (выполнение требований базовой нагрузки) и *пиковое ПХГ* (Peak load UGS) (удовлетворение требований максимальной нагрузки).

Базисное ПХГ — это резервуар большого объема, предназначенный для циклической эксплуатации в базисном технологическом режиме, который характеризуется сравнительно небольшими отклонениями (увеличением или уменьшением в пределах от 10 до 15 %) суточной производительности ПХГ при отборах и закачках газа от среднемесячных значений производительности. Базисное ПХГ используется для удовлетворения сезонного увеличения спроса и способно вместить достаточный объем природного газа, чтобы покрыть долгосрочные сезонные требования. Как правило, расчетный период составляет один год: природный газ закачивают в летнее время (неотопительный сезон: апрель — октябрь), а отбор газа происходитв зимнее время (отопительный сезон: ноябрь — март). Этот тип хранилища отвечает за обеспечение длительных, стабильных поставок природного газа.

Наиболее распространенным типом базисного ПХГ является подземное хранилище газа в истощенных месторождениях газа.

В свою очередь, *пиковое ПХГ* предназначено для поставки газа в короткие сроки, то есть при необходимости природный газ может быть быстро извлечен из хранилища. Пиковое ПХГ предназначено для удовлетворения внезапного, кратковременного повышения спроса на газ. Данный тип хранилища не может вместить столько же природного газа, сколько вмещает базисное ПХГ. Однако, в отличие от базисного ПХГ, пиковое ПХГ может обеспечить поставку газа в более короткие сроки, хоть и в меньшем объеме.

В то время как для базисного ПХГ характерен длительный срок закачки и отбора природного газа, с его обновлением в хранилищах примерно раз в год, в пиковом ПХГ оборот газа происходит раз в несколько дней или недель. Наиболее распространенным типом пикового ПХГ являются соляные каверны, хотя водоносные структуры также могут быть использованы для этих нужд.

В зависимости от размера хранилища газа разделяются на три типа: базовые, районные и локальные.

Базовое ПХГ (Regional UGS) характеризуется объемом активного газа до нескольких десятков миллиардов кубических метров и производительностью до нескольких сотен миллионов кубических метров в сутки, имеет региональное значение и влияет на газотранспортную систему и газодобывающие предприятия.

Районное ПХГ (District UGS) характеризуется объемом активного газа до нескольких миллиардов кубических метров и производительностью до нескольких десятков миллионов кубических метров в сутки, имеет районное значение и влияет на группы потребителей и части газотранспортной системы.

Локальное ПХГ (Local UGS) характеризуется объемом активного газа до нескольких сотен миллионов кубических метров и производительностью до нескольких миллионов кубических метров в сутки, имеет локальное значение, спектр действия ограничен отдельными потребителями.

При закачке природного газа в пласт создается давление, и чем выше это давление в хранилище, тем большая готовность газа к отбору. Для закачки и отбора газа в хранилищах используются скважины [6, 7].

В подземных хранилищах газа содержится буферный газ, или как его еще называют «подушечный газ». В активном хранилище буферный газ включает как местный (первичный), так и закаченный газ. Буферный или «подушечный газ» — это объем газа, который должен оставаться в хранилище для обеспечения необходимого давления для отбора составляющей активного газа. Активный газ — это объем газа в резервуаре для хранения, который может быть извлечен при нормальной эксплуатации хранилища. Емкость хранилища обычно соотносится с объемом активного газа. Операторы установок подземного хранилища после оценки работы их производства могут переквалифицировать часть рабочего газа в буферный газ.

В любом подземном хранилище газа есть определенный объем газа, который не может быть извлечен и должен постоянно находиться в пласте. Данный тип газа называется неизвлекаемым. Природный газ может храниться под давлением несколькими способами. Наиболее распространенными считаются следующие типы хранения (рис. 2): в истощенных или частично выработанных газовых, газоконденсатных месторождениях (Depleted or partially developed gas fields); в выработанных нефтяных месторождениях (Developed oil fields) — это большинство хранилищ газа; в водонасыщенных пластах (Aquifers); в соляных кавернах (Salt cavern). Кроме того, природный газ может храниться в наземных хранилищах в охлаждаемых резервуарах, где происходит сжижение природного газа (СПГ) (Liquefied Natural Gas (LNG)). СПГ отправляется и хранится в жидком виде, соответственно, такой газ занимает гораздо меньше места, чем газообразный природный газ.

Распределение активного объема газа по типам подземных хранилищ газа в мире, млрд ${\rm M}^3$: в истощенных месторождениях газа — 272,7 (76 %); в истощенных месторождениях нефти — 18,2 (5 %); в водонасыщенных пластах — 45,7 (13 %); в

соляных кавернах — 22,2 (6 %). Все эти типы газовых хранилищ газа являются безопасными [8, 9].

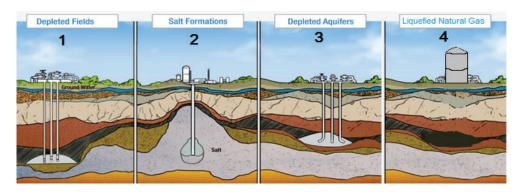


Рис. 2. **Виды подземных хранилищ газа:** 1 — истощенные газовые или нефтяные месторождения; 2 — соляные каверны; 3 — водонасыщенные пласты; 4 — сжиженный природный газ

Каждый тип хранения имеет свои собственные физические характеристики (пористость, проницаемость, возможность удерживания) и экономические характеристики (подготовка площадки и затраты на обслуживание, стоимость доставки и цикличность), которые определяют его пригодность для конкретных применений. Двумя из наиболее важных характеристик подземного хранилища газа являются его способность удерживать природный газ для дальнейшего использования и скорость отбора и закачки газа.

Примерно 20 % всего природного газа, потребляемого в зимний период, доставляют из подземных хранилищ. Вместительность подземных хранилищ газа увеличилась на 18,2 % в период между 2002 и 2014 годами [2, 3].

В настоящее время не установлено единой глубины, которая бы универсально подходила для всех типов подземного хранения газа, поскольку многое будет зависеть от геологии района и работ, необходимых для предотвращения утечки газа в ниже- и вышележащие пласты (рис. 3):

- хранилища в скальных кавернах (rock caverns) выложены из листовой стали, поддерживаемой бетоном, могут быть на глубине в 100–200 м;
- хранилища в бывших соляных кавернах или бывших нефтяных резервуарах, как правило, находятся на глубине от 200 до 700 м;
- хранилища на истощенных месторождениях углеводородов и водоносных структурах в настоящее время находятся на глубине около 400 и 1 000 м, а некоторые хранилища на истощенных месторождениях расположены на глубине от 1 300 до 2 300 м.

Основные факторы, которые следует учитывать при оценке возможностей подземного хранения газа:

- целостность геологической структуры и предполагаемые работы не допускают неконтролируемой утечки газа;
- результаты предварительного моделирования возможных режимов и поведения давления газа, поскольку это будет контролировать давление и объемы газа, которые могут быть сохранены и извлечены, и темпов закачки и отбора газа;
- количество и расположение скважин, необходимых для эффективной эксплуатации хранилища;
- поверхность, включая инфраструктуру, необходимую для поддержания возможности хранения и движения газа в/из хранилища.

Пригодность каждого типа и местоположения подземного хранилища газа будет зависеть от детального изучения геологии территории и анализа характери-

стик, которые могут потребоваться, чтобы доказать целостность предлагаемого хранилища [10, 11].

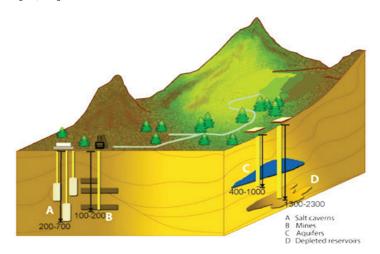


Рис. 3. **Приблизительная глубина каждого вида подземных хранилищ газа:** A — соляные каверны, B — скальные каверны, C — водонасыщенные пласты, D — истощенные газовые или нефтяные месторождения

Таким образом, с экономической точки зрения строительство $\Pi X \Gamma$ является выгодным проектом.

С технической точки зрения это очень сложный процесс, и риски всегда есть. Поэтому детальная классификация ПХГ по типу будет рассмотрена при дальнейшем исследовании.

Библиографический список

- 1. Ширковский А. И. Подземное хранение газа. М., 1960. 75 с.
- 2. Study on Underground Gas Storage in Europe and Central Asia / United Nations Economic Commission for Europe in close cooperation with International Gas Union. Geneva, 2013. 136 p. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/wpgas/pub/Report_UGS_Study_www.pdf.
- 3. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions on an EU strategy for liquefied natural gas and gas storage. Brussels, 2016. 35 p. Available at: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1 EN ACT part1 v10-1.pdf.
 - 4. Коротаев Ю. П., Ширковский А. И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. М., 1984. 288 с.
- ATG Association technique de l'industrie du gaz en France. Aide-memoire de l'industrie du gaz. France, 1990.
 884 p.
- ПБ 08-621-03. Правила создания и эксплуатации подземных хранилищ газа в пористых пластах. Серия 08. Выпуск 11 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gostrf.com/normadata/1/4294816/4294816718.pdf.
 - Flanigan O. Underground Gas Storage Facilities: Design and Implementation. London, 1995. 198 с.
 Нагорный В. П., Глоба В. М., Подземные хранилища углеводородов. Киев, 2014. 287 с.
 - Сидоренко М. В. Подземное хранение газа. М., 1965. 140 с.
 - 10. Смирнов В. И. Строительство подземных газонефтехранилищ. М., 2000. 249 с.
 - 11. Физика пласта, добыча и подземное хранение газа / О. М. Ермилов [и др.]. М., 1996. 541 с.

Сведения об авторах

Арсан Шади Арсанович, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Томенский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89803242763, e-mail: shadiarsan@geologist.com

Ягафаров Алик Каюмович, д. г.-м. н., профессор, академик РАЕН, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 89504931998

Ваганов Юрий Владимирович, к. т. н., доцент, заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, тел. 8(3452)993177, e-mail: burenie@rambler.ru

Information about the authors

Arsan Sh. A., Postgraduate at the Department of Development and Exploitation of Oil and Gas Fields, Industrial University of Tyumen, phone: 89803242763, e-mail: shadiarsan@geologist.com

Yagafarov A. K., Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Industrial University of Tyumen, phone: 89504931998

Vaganov Yu. V., Candidate of Engineering, Associate Professor at the Department of Drilling of Oil and Gas Wells, Industrial University of Tyumen, phone: 8(3452)993177, e-mail: burenie@rambler.ru